

УДК 550.83+550.81

DOI: 10.23671/VNC.2018.3.16544

КОМБИНИРОВАННЫЕ АППРОКСИМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГРАВИРАЗВЕДКИ И МАГНИТОРАЗВЕДКИ

© 2018 И.А. Керимов, д.ф.-м.н., проф., И.Э. Степанова, д.ф.-м.н.,
Д.Н. Раевский, к.ф.-м.н.

ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1,
e-mail: kerimov@ifz.ru

В статье исследуется взаимосвязь различных вариантов метода линейных интегральных представлений. Комбинированные аппроксимации рельефа и геопотенциальных полей позволяют осуществить более тонкую «настройку» метода при решении обратных задач геофизики и геоморфологии, а также наиболее полно учесть априорную информацию о высотных отметках и элементах аномальных полей. Приводится описание методики нахождения численного решения обратной задачи по поиску распределений эквивалентных по внешнему полю носителей масс. Обсуждаются результаты математического эксперимента.

Ключевые слова: аппроксимация, регуляризация, комбинированные методы, интегральные представления, погрешность

В последние годы была разработана новая теория построения аналитических аппроксимаций аномальных гравитационных и магнитных полей на основе метода линейных интегральных представлений В.Н. Страхова [Керимов, 2003, 2009а, б, 2011а; Страхов, 1995; Страхов, Керимов, 2001; Страхов и др., 2002, 2009; Страхов, Степанова, 2002а, б]. Для потенциалов аномального гравитационного и аномального магнитного полей в качестве соответствующих линейных интегральных представлений были предложены следующие модификации: • представление интегралом Фурье (F-аппроксимация); • представление суммой потенциалов простого и двойного слоев на заданной поверхности S (S-аппроксимация). Две версии метода S-аппроксимаций (локальная и региональная), F- и R-аппроксимации являются вариантами метода линейных интегральных представлений; основные характеристики этого метода изложены в более ранних работах авторов [Керимов, 2003, 2009а, б, 2011а, б; Страхов, 1995; Страхов, Керимов, 2001; Страхов и др., 2002, 2009; Страхов, Степанова, 2002а, б и др.]. Алгоритмы и компьютерные технологии F-аппроксимации были разработаны И.А. Керимовым, а S-аппроксимации И.Э. Степановой [Страхов и др., 2009].

Ниже рассмотрены две аппроксимационные конструкции использования метода линейных интегральных представлений (МЛИП): нахождение спектров Фурье элементов аномальных потенциальных полей (F-аппроксимация) и представление элементов аномальных потенциальных полей с помощью основной формулы теории гармонических функций (S-аппроксимация).

В рамках метода S-аппроксимаций известная компонента гравитационного поля аппроксимируется суммой простого и двойного слоев, распределенных на некоторой совокупности областей (в локальном случае ими являются горизонтальные плоскости, в региональном – сферы или сфероиды). В методе F-аппроксимаций

элементы аномальных потенциальных полей представляются интегралом Фурье, а R-аппроксимации получаются при так называемом лучевом преобразовании.

Методы F-, R- и S-аппроксимаций позволяют получить решение, с помощью которого можно эффективно строить линейные трансформанты поля, а также использовать его в качестве нулевого приближения для решения нелинейной обратной задачи по локализации источников.

В данной работе представлены результаты построения аналитических аппроксимаций аномального гравитационного поля и рельефа в локальном варианте с использованием системы прямоугольных декартовых координат. При этом существенным является тот факт, что S-, F-, R-аппроксимации тесно связаны друг с другом. Возникает идея применить все три описанных ранее в работах авторов варианта метода линейных интегральных представлений совместно с целью построения более качественных моделей геоида и аномальных геопотенциальных полей. R-аппроксимации применяются по той причине, что они позволяют «просвечивать» неизвестные источники, находить неизвестные характеристики объекта по интегральной информации о нем. Метод R-аппроксимаций особенно полезен при решении задач сейсмической томографии, при обработке больших объемов данных профильной съемки и т.п.

Интегральные представления аномальных потенциальных полей (т.е. гармонических в некоторых областях пространства истокообразно представимых функций) весьма тесно связаны друг с другом. Если рассмотреть выражения для элементов матрицы в методе S-аппроксимаций (формула 5), то можно сделать вывод, что преобразование Радона приводит к точно такой же системе линейных алгебраических уравнений, как и S-аппроксимация в локальном варианте, но с представлением искомого элемента поля в виде потенциала простого слоя. Что нам дает тесная связь преобразования Радона и S-аппроксимаций элементов аномальных полей и функций, описывающих рельеф земной поверхности? Такая зависимость различных интегральных преобразований друг от друга позволяет по найденному решению СЛАУ определять важные характеристики изучаемой геологической среды: мы можем осуществить лучевое преобразование данных наблюдений и выявить особенности строения земной коры вдоль интересующих нас направлений. Можно вычислять среднее значение лучевого преобразования элемента поля в заданной точке и т.п. Таким образом, мы получаем возможность восстановить 3D-среду, т.е. решить задачу, аналогичную задачам компьютерной томографии.

В работах [Раевский, Степанова, 2015а, б] был предложен модифицированный метод S-аппроксимаций, который позволяет находить более устойчивые приближенные решения обратных задач геофизики и геоморфологии. Этот метод применялся при проведении расчетов, описанных в настоящей работе.

Компьютерные технологии

Алгоритмы построения аппроксимационных конструкций аномального гравитационного и аномального магнитного полей, основанные на представлении интегралом Фурье (F-аппроксимация) и суммой простого и двойного слоев на заданной поверхности S (S-аппроксимация) опубликованы в ряде работ [Керимов, 2011а; Страхов, Керимов, 2001; Страхов и др., 2009; Страхов, Степанова, 2002а]. Компьютерные технологии построения аппроксимационных конструкций обоих типов, а также использования полученных аппроксимаций для решения некоторых задач гравиметрии и магнитометрии подразделяются на три этапа.

Первый этап – формирование элементов матрицы A . На этом этапе формируется матрица A . Предварительно с использованием программ сортировки и выборки из исходных пунктов исключается определенное количество ($N_{\text{контр}}$) пунктов наблюдений.

Как было показано выше задача построения F– или S-аппроксимационной конструкции вариационной постановкой сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$A\lambda = f_{\delta}, \quad (1)$$

в которой:

λ – N -вектор с компонентами λ_i (множители Лагранжа),

f_{δ} – N -вектор с компонентами $f_{i,\delta}$,

A – $(N \times N)$ – матрица со свойством

$$A = A^T \geq 0 \quad (2)$$

и элементами a_{pq} , $1 \leq p, q \leq N$.

F-аппроксимация. Для F-аппроксимации расчетная формула для вычисления элементов матрицы A выглядит в следующем виде:

$$a_{pq} = \frac{3(2z_{p,q}^3 - 3\rho_{p,q}^2 z_{p,q})}{2\pi(z_{p,q}^2 + \rho_{p,q}^2)^{3.5}}, \quad (3)$$

где

$$z_{p,q} = x_3^{(p)} + x_3^{(q)} + 2H,$$

$$\rho_{p,q} = \sqrt{(x_1^{(p)} - x_1^{(q)})^2 + (x_2^{(p)} - x_2^{(q)})^2}.$$

Для вычисления диагональных элементов матрицы (для случая, когда $p=q$) используется следующее выражение:

$$a_{pp} = \frac{3}{16\pi(x_3^{(p)} + H)^4}. \quad (4)$$

S-аппроксимация. Для S-аппроксимации расчетная формула для вычисления элементов матрицы A имеет следующий вид:

$$a_{ij} = 2\pi \left\{ \frac{z_i + z_j}{\rho_{i,j}^3} + \frac{(z_i + z_j)(9\rho_{i,j}^2 - 6(z_i + z_j)^2)}{\rho_{i,j}^7} \right\}, \quad (5)$$

где

$$1 \leq i, j \leq N.$$

$$\rho_{i,j}^2 = (z_i + z_j)^2 + (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$$

Второй этап – решение СЛАУ. Решение СЛАУ является основной вычислительной проблемой при построении аппроксимационных конструкций на основе линейных интегральных представлений. В последние годы В.Н. Страховым разра-

ботана новая теория регуляризации СЛАУ, основные положения которой изложены в большой серии работ [Страхов, 2012; Страхов и др., 2009 и др.]. Эти методы решения СЛАУ реализованы Страховым А.В. в пакете прикладных программ П-СППМ для СЛАУ с симметрической положительно полуопределенной матрицей и приближенно заданной правой частью. Для решения СЛАУ использовались следующие программы: S-1 (модифицированный классический метод регуляризации для систем с симметрическими положительно полуопределенными матрицами – метод М.М. Лаврентьева); S-5 (усовершенствованный В.Н. Страховым метод регуляризации разложения Холецкого); S-6 (итерационный метод В.Н. Страхова) [Керимов, 2011а; Страхов, 1995; Страхов и др., 2009]. Отличительной особенностью всех перечисленных выше методов является введение усреднения пробных решений. В настоящей статье для решения СЛАУ наряду с перечисленными используется также регуляризованный итерационный трехслойный метод Чебышева с применением блочного метода контрастирования. Описание метода можно найти в работах [Раевский, 2016; Степанова и др., 2016].

Третий этап – восстановление поля и нахождение его трансформант

F-аппроксимация. На данном этапе используя значения действительной $A(u,v)$ и мнимой $B(u,v)$ частей комплексного спектра Фурье и значений компонент λ_i вектора λ множителей Лагранжа, вычисленных путем решения СЛАУ с использованием перечисленных выше программ, вычисляются значения поля и его трансформант.

S-аппроксимация. Программы MATPS2CON.for, MAVPS2N.for позволяют находить аналитическое продолжение полей, вычислять производные полей и находить элементы матрицы при использовании В1. При запуске обе эти программы запрашивают имя файла (его следует вводить в кавычках: 'a1.dat', например, в котором содержатся необходимые параметры). Примеры файлов – 'matgr3bsum.txt' для MATPS2CON.for и 'mavgr3ib6.txt' для MAVPS2N.for.

Модельный пример № 1.

Аппроксимация гравитационного поля модифицированным методом S-аппроксимации

Ниже приведены результаты расчетов на модельном примере в локальном варианте. Рассматривается область протяженностью 60 км по осям ОХ и ОУ. Рельеф относительно спокойный. В качестве аномалиеобразующих объектов выбрано 11 торов. Глубоко залегающее тело 11 создает дополнительный фон, осложняющий наблюдаемое поле, а некоторые объекты (6,7) выходят за границы исследуемой территории, что обеспечивает дополнительное затруднение при решении СЛАУ.

К вычисленному полю f_i в заданных пунктах рельефа искусственно добавлялась помеха $\mathcal{F}_i, 1 \leq i \leq N$, таким образом, что $\|\mathcal{F}\|_E / \|f\|_E = 0.0355$. Сеть нерегулярная, общее количество гравиметрических пунктов $N=90601$. Модельное аномальное гравитационное поле и карта изолиний рельефа представлены на рисунке 1.

В рамках модифицированного метода S-аппроксимаций аномальное поле аппроксимировалось суммой простого и двойного слоев, распределенных на двух плоскостях, залегающих на глубинах 0,9 и 2,5 км соответственно. СЛАУ решалась параллельным алгоритмом регуляризованного итерационного трехслойного метода Чебышева с применением блочного метода контрастирования (P-BCM) и без его применения (P-CN). Вычисления проводились с использованием ресурсов супер-

компьютера «Ломоносов» НИВЦ МГУ [Раевский, Степанова, 2015а, б, 2016; Степанова, 2009а, б].

Минимальное число процессоров, при котором решалась система, равняется 100. Все трансформанты поля найдены с высокой степенью точности: коэффициент корреляции θ при построении всех трансформант больше 0,9. Разница Δ между теоретически заданным и аппроксимированным элементом даже при вычислении второй вертикальной производной относительно невысокая по сравнению с предыдущими примерами. Аналитические продолжения поля вниз и вверх остаются устойчивыми.

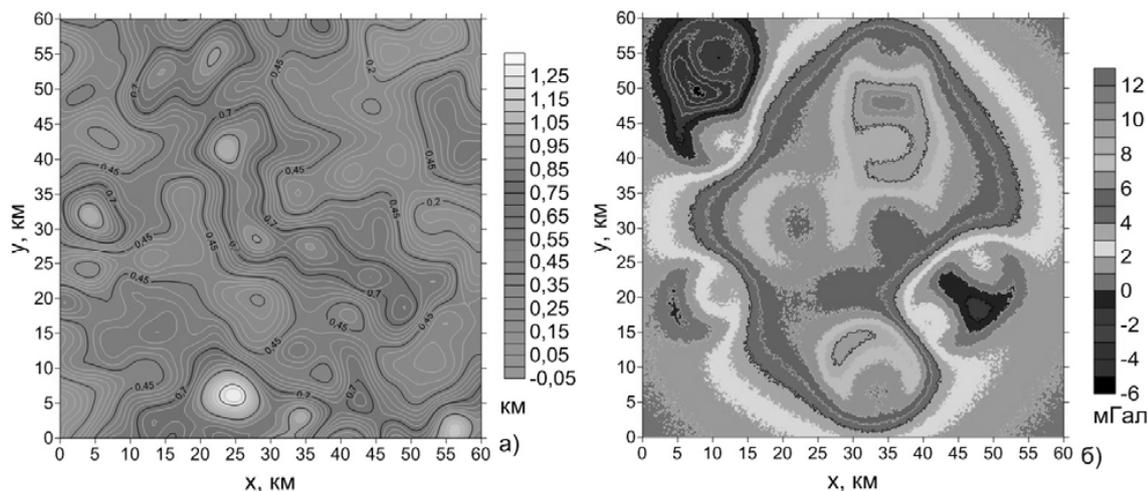


Рис. 1. Модельный пример №1
а) карта изолиний рельефа; б) карта изоаномал.

На рисунках 2 и 3 представлены графические результаты вычисления некоторых линейных трансформант поля: как видно, результаты практически не отличаются ни количественно, ни качественно. Это обусловлено хорошо подобранными параметрами модели, а также большим объемом интерпретируемых данных. При большем количестве гравиметрических пунктов аппроксимация поля будет достоверней.

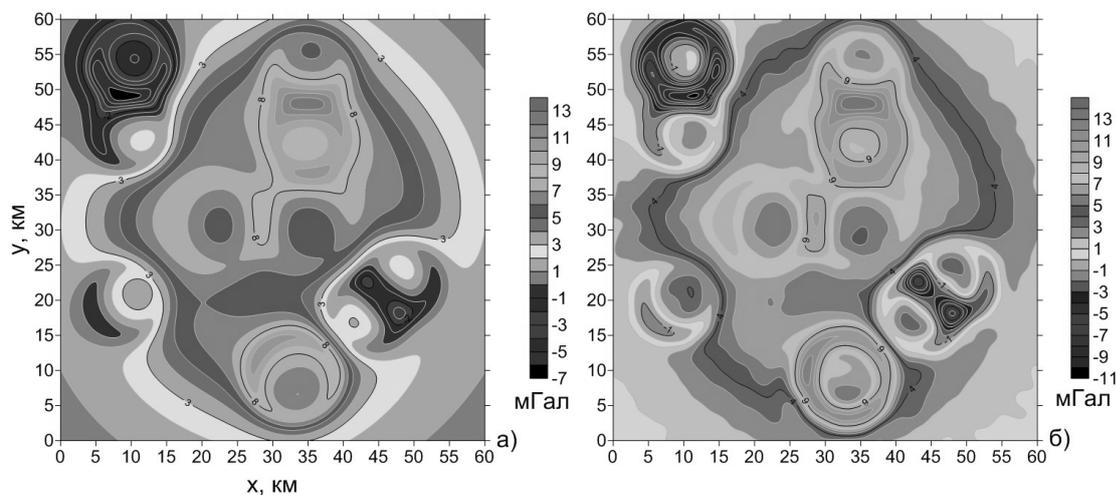


Рис. 2. Модельный пример №1.
Аналитическое продолжения поля в нижнее полупространство на $H = -0,5$ км:
а) рассчитанное по модели; б) полученное с помощью S-аппроксимации.

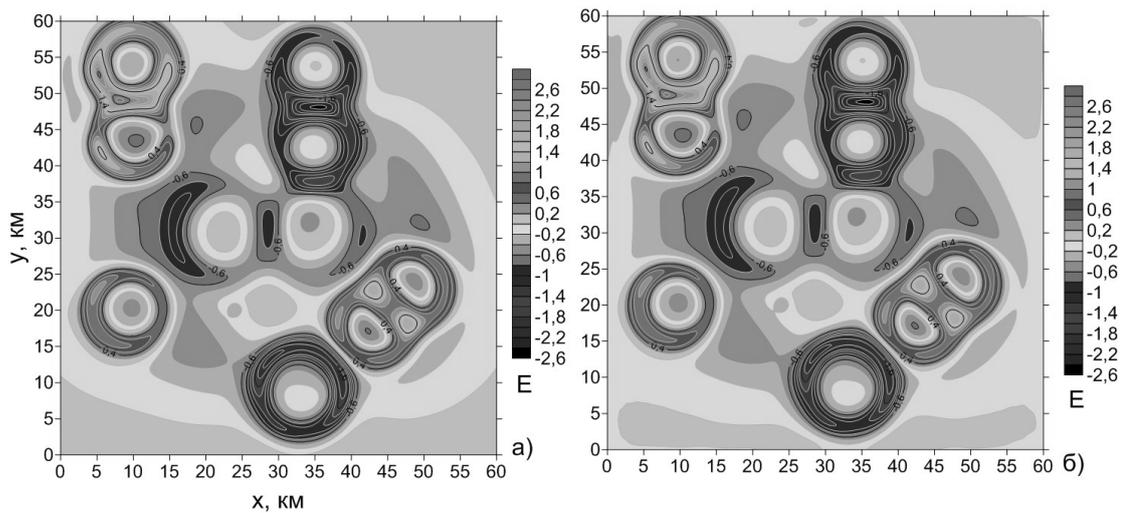


Рис. 3. Модельный пример №1.

Вертикальная производная гравитационного поля W_z :
 а) теоретическая; б) полученная с помощью S-аппроксимации

Модельный пример №2.

Построение аналитической аппроксимации рельефа на основе F-аппроксимации

Построение аналитических аппроксимаций функции $\xi_3(\xi_1, \xi_2)$ следует выполнять методом линейных интегральных представлений, исходя из следующего фундаментального факта: функция, непрерывная (либо даже из более общего класса $L_2(-\infty, +\infty)$ функций, с суммируемым квадратом на плоскости переменных (ξ_1, ξ_2)) на произвольной горизонтальной плоскости (плоскости переменных (ξ_1, ξ_2)) может рассматриваться как предельные значения некоторой функции трех переменных (ξ_1, ξ_2, ξ_3) , гармонической в полупространстве $\xi_3 < 0$, верхнем к заданной горизонтальной плоскости.

В качестве интегральных представлений функции $\xi_3(\xi_1, \xi_2)$ могут использоваться, основанные на представлении интегралом Фурье. Построение аналитической аппроксимации функции $\xi_3(\xi_1, \xi_2)$ в конечном итоге редуцируется к решению СЛАУ с симметричной положительно полуопределенной матрицей A размерности $(n \times n)$, где n — число точек на S с известными координатами (ξ_1, ξ_2, ξ_3) , использованных для построения аналитической аппроксимации.

Пусть в N точках заданы (в декартовой системе координат $0 \leq \xi_1, \xi_2, \xi_3$) приближенные значения высот $\xi_{3,\delta}^{(i)}$ некоторых точек $(\xi_1^{(i)}, \xi_2^{(i)})$, $i = 1, 2, \dots, N$. Принимается, что

$$\xi_{3,\delta}^{(i)} = \xi_3^{(i)} + \delta_3^{(i)}, \quad (6)$$

где

$\xi_3^{(i)}$ — точные значения высот,

$\delta_3^{(i)}$ — погрешности в задании высот, и что координаты $(\xi_1^{(i)}, \xi_2^{(i)})$ заданы точно.

Принимается, что априорно известны константы в неравенствах

$$0 < \delta_{\min}^2 \leq \|\delta \xi_3\|^2 \leq \delta_{\max}^2 < +\infty \tag{7}$$

и что

$$(z, \delta z) = 0, \tag{8}$$

где

$\delta \xi_3$ – N -вектор помехи (с компонентами $\delta_3^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots, N$),

$\xi_3^{(i)}$ – N -вектор полезного сигнала (с компонентами $\xi_3^{(i)}$, $1 \leq i \leq N$).

По указанным данным требуется построить аналитическое представление функции $\xi_3(\xi_1, \xi_2)$ в форме интеграла Фурье.

Элементы матрицы A для F -аппроксимации рельефа вычисляются в элементарных функциях:

$$a_{i,j} = \frac{2\varepsilon}{\pi(4\varepsilon^2 + (\xi_1^{(i)} - \xi_1^{(j)})^2 + (\xi_2^{(i)} - \xi_2^{(j)})^2)^{3/2}}. \tag{9}$$

Для линейной аппроксимации $\tilde{z}^{(a)}(x, y)$ на основании интеграла Фурье получаем соответствующее интегральное представление, при этом интегралы также вычисляются в элементарных функциях:

$$\tilde{\xi}_3^{(j)}(\xi_1^{(j)}, \xi_2^{(j)}) = \frac{2\varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{(4\varepsilon^2 + (\xi_1^{(i)} - \xi_1^{(j)})^2 + (\xi_2^{(i)} - \xi_2^{(j)})^2)^{3/2}} \tag{10}$$

Для оценки точности аппроксимации рельефа поверхности Земли интегралом Фурье на реальных топографических материалах были использованы данные по высотным отметкам по Сибирской площади, описанной выше. Всего было использовано 2721 точек. F -аппроксимации рельефа были получены с различными параметрами $\varepsilon = 0,05, 0,10$ и $0,20$ м. Полученные СЛАУ решались с использованием описанных выше программ S-1, S-5 и S-6, а также использовались значения множителей Лагранжа, полученные как средние арифметические по трем методам. Полученные результаты (относительные и среднеквадратические погрешности) представлены в таблице 1. Оценка сходимости различных методов решения СЛАУ представлена в таблице 2.

Таблица 1

ε м	σ_{\min} м	σ_{\max} м	$\gamma_i = \frac{\ h_{изм} - h_{анпр}^{(i)}\ _E}{\ h_{изм}\ _E}$				Среднеквадратические отклонения, м			
			γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4
0,05	0,04	0,10	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,07	0,07	0,06	0,05
0,10	0,10	0,14	0,0006	0,0006	0,0006	0,0003	0,12	0,11	0,12	0,06
0,20	0,10	0,14	0,0006	0,0006	0,0003	0,0004	0,12	0,11	0,06	0,08

Таблица 2

ε М	σ_{\min} М	σ_{\max} М	$\gamma_{ik} = \frac{\ h_{\text{аннр}}^{(i)} - h_{\text{аннр}}^{(k)}\ _E}{\ h_{\text{изм}}\ _E}$					
			γ_{12}	γ_{13}	γ_{14}	γ_{23}	γ_{24}	γ_{34}
0,05	0,04	0,10	0,0000	0,0003	0,0001	0,0005	0,0002	0,0003
0,10	0,10	0,14	0,0011	0,0007	0,0005	0,0008	0,0006	0,0003
0,20	0,10	0,14	0,0001	0,0006	0,0002	0,0006	0,0002	0,0004

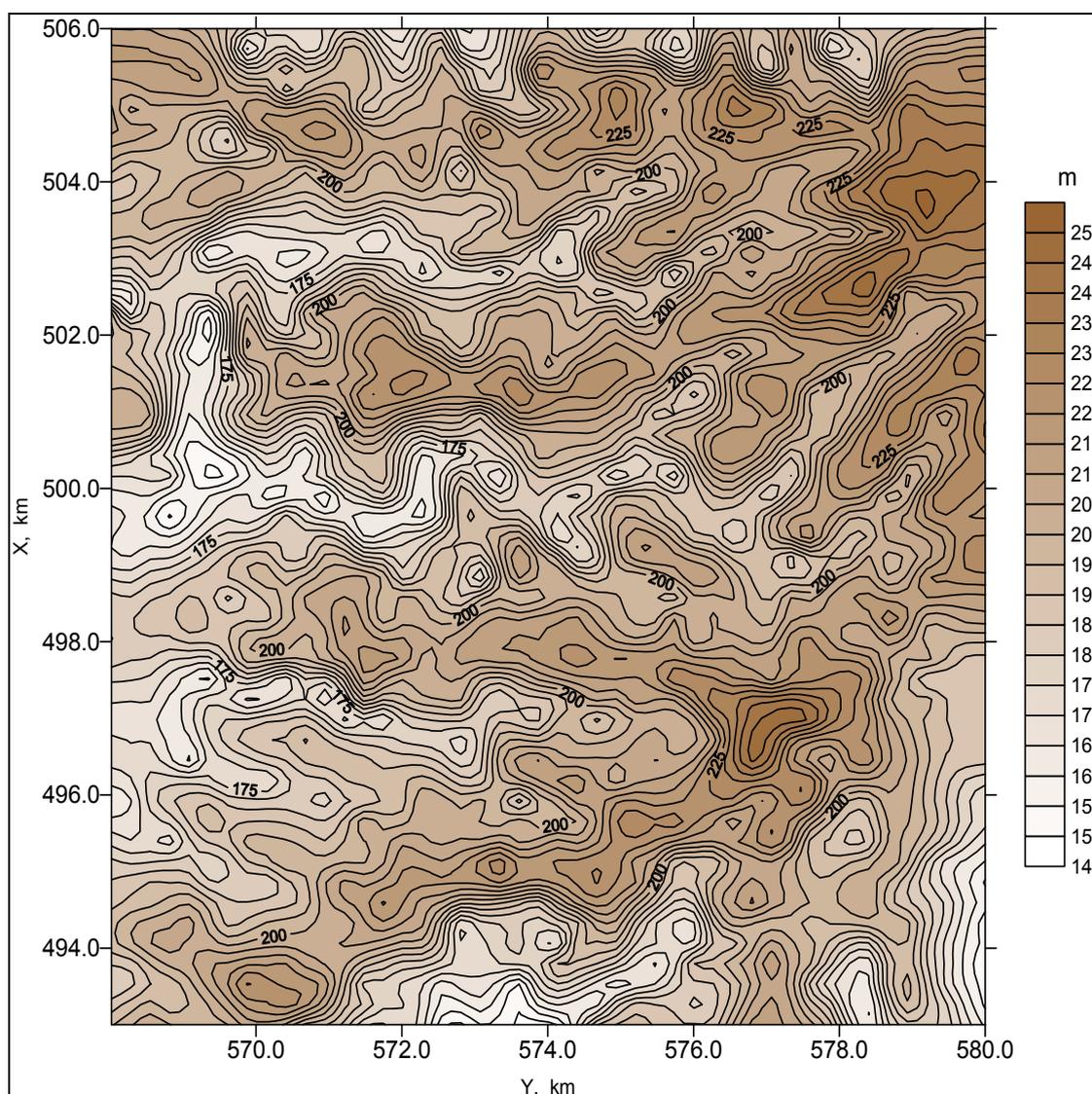


Рис. 4. Модельный пример №2
Карта рельефа земной поверхности по результатам F-аппроксимации

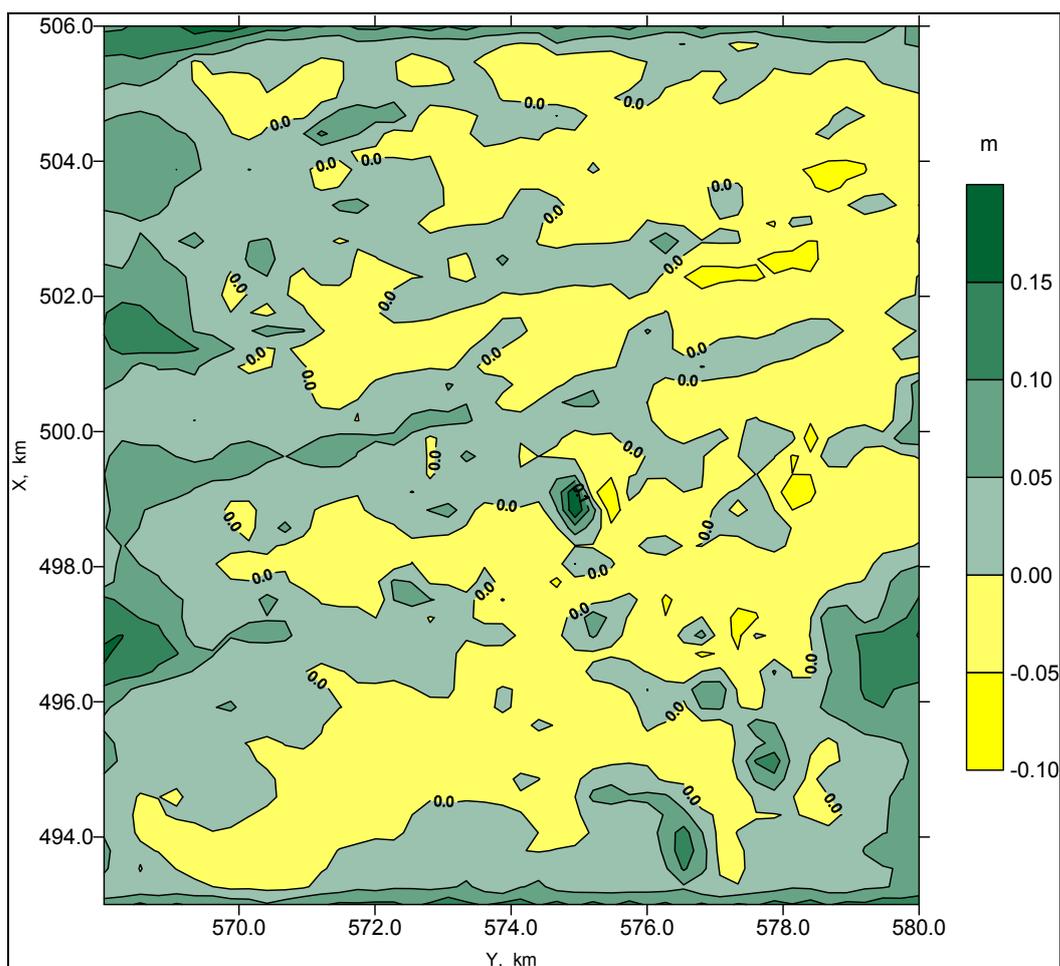


Рис. 5. Модельный пример №2
Карта разностного рельефа земной поверхности

Модельный пример № 3

Построение аналитической аппроксимации рельефа совместной S-, F-аппроксимацией

Функция $\Delta\xi_3(\xi_1, \xi_2)$, описывающая рельеф земной поверхности, представляет собой значения вертикальной производной потенциала большой группы (7000) точечных источников с различной избыточной плотностью, залегающих на расстоянии от 3,7 до 5,7 км ниже дневного рельефа, в точках горизонтальной плоскости $x_3 = 0$ км на равномерной сети точек $x^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$, $1 \leq i \leq N$. Общее количество точек измерений $N = 9656$, сеть нерегулярная. Из-за большого количества точечных источников смоделированный рельеф напоминает реальный в горной местности (рис. 4 и 5).

Из полученных результатов по построению аналитической аппроксимации рельефа следует, что совместная S-F-аппроксимация позволяет построить аналитическую аппроксимацию рельефа горной поверхности с достаточно высокой степенью точности (среднеквадратическое отклонение $\sigma_0 \approx 20$ см). Построение аналитической аппроксимации горного рельефа – одна из самых трудных задач, поэтому общее вычислительное время здесь достаточно велико.

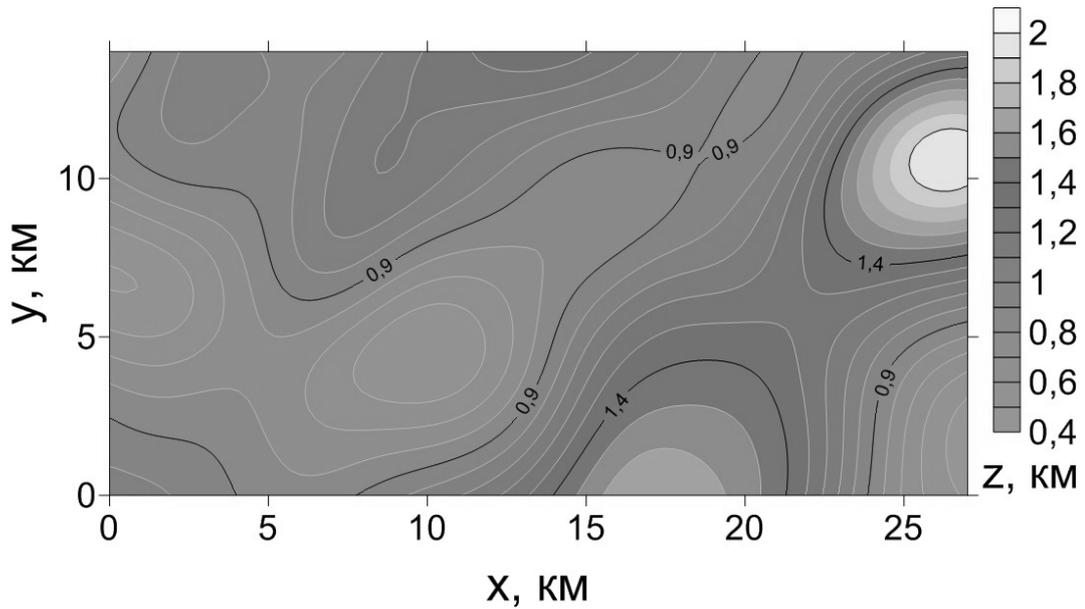


Рис. 6. Модельный пример №3.
Карта изолиний рельефа.

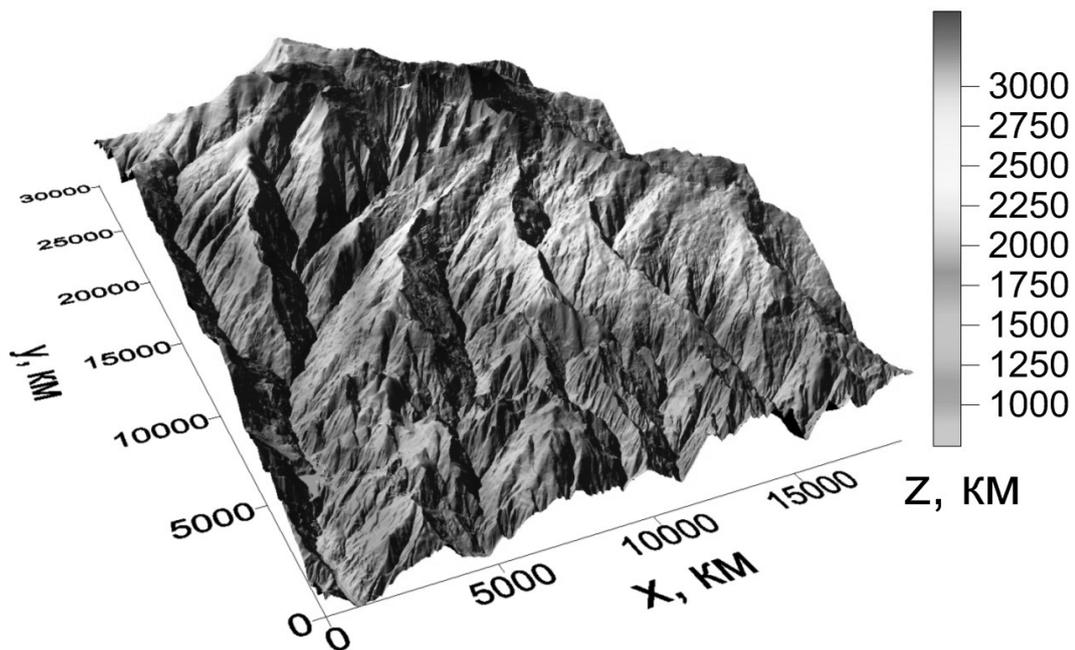


Рис. 7. Модельный пример №3.
Трехмерное изображение рельефа.

Выводы

Результаты апробирования алгоритмов и программ аппроксимационного подхода к спектральному анализу гравитационных и магнитных аномалий и построению аналитических аппроксимаций с помощью основной формулы теории гармонических функций на модельных и фактических гравиметрических и магнитометрических данных позволяют сделать следующие выводы:

1. Результаты исследований подтверждают теоретические выводы об эффективности аппроксимационного подхода к спектральному анализу (F-аппроксимация) гравитационных и магнитных аномалий и к построению аппроксимаций с помощью суммы простого и двойного слоев (S-аппроксимация).
2. Методы F- и S-аппроксимации, модифицированный метод S-аппроксимации, а также метод совместной S-, F-аппроксимации являются высокоэффективными способами аналитической аппроксимации гравимагнитных полей и рельефа земной поверхности.
3. Разработанные алгоритмы и программы являются эффективным инструментом обработки и интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных, заданных на неравномерной и разновысотной сети.
4. Используемые методы и компьютерные программы решения СЛАУ (модифицированный метод М.М. Лаврентьева, модифицированный метод Холецкого и итерационный метод В.Н. Страхова) имеют достаточно высокую сходимость между собой.
5. Для нахождения устойчивых решений больших СЛАУ ($N \geq 10000$) целесообразно использовать регуляризованный итерационный трехслойный метод Чебышева с применением блочного метода контрастирования.

Литература

1. Керимов И.А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. I. Методика и результаты опробования на модельных примерах // Физика Земли. – 2003. – №1. – С. 57–76.
2. Керимов И.А. Использование F-аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. II. Результаты опробования на материалах гравиметрических и магнитометрических съемок // Физика Земли. – 2009а. – №5. – С. 77–93.
3. Керимов И.А. F-аппроксимации рельефа земной поверхности // Физика Земли, 2009б. – №8. – С. 101–112.
4. Керимов И.А. Метод F-аппроксимации при решении задач гравиметрии и магнитометрии. – М.: Физматлит, 2011а. – 264 с.
5. Керимов И.А. Теория и компьютерные технологии аналитических аппроксимаций аномальных потенциальных полей // Геология и геофизика Юга России. – 2011б. – №2. – С. 50–63.
6. Раевский Д.Н. Параллельные алгоритмы решения плохо обусловленных систем линейных алгебраических уравнений больших размерностей // Суперкомпьютерные дни в России: труды международной конференции. – М.: МГУ, 2016. – С. 912–925.
7. Раевский Д.Н., Степанова И.Э. О решении обратных задач гравиметрии с помощью модифицированного метода S-аппроксимаций // Физика Земли. – 2015а. – №2. – С. 44–54.
8. Раевский Д.Н., Степанова И.Э. Модифицированный метод S-аппроксимаций. Региональный вариант // Физика Земли. – 2015б. – №2. – С. 55–66.
9. Степанова И.Э. Метод R-аппроксимаций при интерпретации данных детальной гравиметрической и магнитометрической съемок // Физика Земли. – 2009а. – № 4. С. 17–30.
10. Степанова И.Э. Метод R-аппроксимаций при интерпретации данных гравимагниторазведки // Геофизический журнал. – 2009б. – Т. 31. №3. – С. 53–62.

11. Степанова И.Э., Раевский Д.Н., Щепетилов А.В. О повышении эффективности модифицированного метода S-аппроксимаций // Физика Земли. – 2016. – №1. – С. 149–160.
12. Страхов В.Н. Геофизика и математика // Физика Земли. – 1995. – №12. – С. 4–23.
13. Страхов В.Н., Керимов И.А. Аппроксимационные конструкции спектрального анализа (F-аппроксимация) гравиметрических данных // Физика Земли. – 2001. – №12. – С. 3–20.
14. Страхов В.Н., Керимов И.А., Степанова И.Э. Разработка теории и компьютерной технологии построения линейных аналитических аппроксимаций гравитационных и магнитных полей. – М.: ИФЗ РАН, 2009. – 254 с.
14. Страхов В.Н., Степанова И.Э. Метод S-аппроксимаций и его использование при решении задач гравиметрии (локальный вариант) // Физика Земли. – 2002. – №2. – С. 3–19.
16. Страхов В.Н., Степанова И.Э. Метод S-аппроксимаций и его использование при решении задач гравиметрии (региональный вариант) // Физика Земли. – 2002. – №7. – С. 3–12.
17. Страхов В.Н., Степанова И.Э., Керимов И.А. К вопросу о вычислении поправок за рельеф // Физика Земли. – 2002. – №4. – С. 55–66.

DOI: 10.23671/VNC.2018.3.16544

COMBINED APPROXIMATION METHODS FOR SOLVING THE PROBLEMS OF GRAVITY AND MAGNETIC PROSPECTING

© 2018 I.A. Kerimov, Sc. Doctor (Phys.-Math.), Prof.,
I.E. Stepanova, Sc. Doctor (Phys.-Math.),
D.N. Raevskiy, Sc. Candidate (Phys.-Math.)

The Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 123995 Moscow, B. Gruzinskaya Str., 10-1,
e-mail: kerimov@ifz.ru

The article investigates the interrelation of various variants of the method of linear integral representations. Combined approximations of the relief and geopotential fields allow for a more subtle «tuning» of the method in solving the inverse problems of geophysics and geomorphology, and also take into account a priori information about altitude marks and elements of anomalous fields. A description of the procedure for finding the numerical solution of the inverse problem in the search for distributions of mass carriers equivalent in the external field is given. The results of a mathematical experiment are discussed.

Keywords: approximation, regularization, combined methods, integral representations, error.

References

1. Kerimov I.A. Ispol'zovanie F-approksimacii pri interpretacii gravimetricheskikh dannyh. I. Metodika i rezul'taty oprobovaniya na model'nyh primerah [The use of F-approximation in the interpretation of gravimetric data. I. Methods and results of testing on model examples]. *Fizika Zemli*. 2003. No.1. Pp. 57–76. (in Russian)

2. Kerimov I.A. Ispol'zovanie F-approksimacii pri interpretacii gravimetriceskih dannyh. II. Rezul'taty opробovanija na materialah gravimetriceskih i magnitometriceskih s#emok [The use of F-approximation in the interpretation of gravimetric data. II. Results of testing on gravimetric and magnetometric surveys]. *Fizika Zemli*. 2009a. No.5. Pp. 77–93. (in Russian)
3. Kerimov I.A. F-approksimacii rel'efa zemnoj poverhnosti [F-approximations of the relief of the earth's surface]. *Fizika Zemli*, 2009b. No.8. Pp. 101–112. (in Russian)
4. Kerimov I.A. Metod F-approksimacii pri reshenii zadach gravimetrii i magnitometrii. [Method of F-approximation in solving problems of gravimetry and magnetometry]. M. Fizmatlit, 2011a. 264 p. (in Russian)
5. Kerimov I.A. Teorija i komp'juternye tehnologii analiticeskih approksimacij anomal'nyh potencial'nyh polej [Theory and computer technologies of analytic approximations of anomalous potential fields]. *Geologija i geofizika Juga Rossii*. 2011b. No.2. Pp. 50–63. (in Russian)
6. Raevskij D.N. Parallel'nye algoritmy reshenija ploho obuslovlennyh sistem linejnyh algebraiceskih uravnenij bol'shih razmernostej [Parallel algorithms for solving ill-conditioned systems of linear algebraic equations of large dimensions]. *Superkomp'juternye dni v Rossii: trudy mezhdunarodnoj konferencii*. M. MGU, 2016. Pp. 912–925. (in Russian)
7. Raevskij D.N., Stepanova I.Je. O reshenii obratnyh zadach gravimetrii s pomoshh'ju modificirovannogo metoda S-approksimacij [On the solution of inverse problems of gravimetry using the modified method of S-approximations]. *Fizika Zemli*. 2015a. No.2. Pp. 44–54. (in Russian)
8. Raevskij D.N., Stepanova I.Je. Modificirovannyj metod S-approksimacij. Regional'nyj variant [Modified method of S-approximations. Regional version]. *Fizika Zemli*. 2015b. No.2. Pp. 55–66. (in Russian)
9. Stepanova I.Je. Metod R-approksimacij pri interpretacii dannyh detal'noj gravimetriceskoj i magnitometriceskoj s#emok [Method of R-approximations in the interpretation of detailed gravimetric and magnetometric data]. *Fizika Zemli*. 2009a. No. 4. Pp. 17–30. (in Russian)
10. Stepanova I.Je. Metod R-approksimacij pri interpretacii dannyh gravimagnitorazvedki [The method of R-approximations in the interpretation of gravimagnetic survey data]. *Geofiziceskij zhurnal*. 2009b. Vol. 31. No.3. Pp. 53–62. (in Russian)
11. Stepanova I.Je., Raevskij D.N., Shhepetilov A.V. O povyshenii jeffektivnosti modificirovannogo metoda S-approksimacij [On improving the efficiency of the modified method of S-approximations]. *Fizika Zemli*. 2016. No.1. Pp. 149–160. (in Russian)
12. Strahov V.N. Geofizika i matematika [Geophysics and Mathematics]. *Fizika Zemli*. 1995. No.12. Pp. 4–23. (in Russian)
13. Strahov V.N., Kerimov I.A. Approksimacionnye konstrukcii spektral'nogo analiza (F-approksimacija) gravimetriceskih dannyh [Approximation constructions of spectral analysis (F-approximation) of gravimetric data]. *Fizika Zemli*. 2001. No.12. Pp. 3–20. (in Russian)
14. Strahov V.N., Kerimov I.A., Stepanova I.Je. Razrabotka teorii i komp'juternoj tehnologii postroenija linejnyh analiticeskih approksimacij gravitacionnyh i magnitnyh polej. [Development of the theory and computer technology of constructing linear analytical approximations of gravitational and magnetic fields]. M. IFZ RAN, 2009. 254 p. (in Russian)

15. Strahov V.N., Stepanova I.Je. Metod S-approximacij i ego ispol'zovanie pri reshenii zadach gravimetrii (lokal'nyj variant) [S-approximation method and its use in solving the problems of gravimetry (a local version)]. Fizika Zemli. 2002. No.2. Pp. 3–19. (in Russian)

16. Strahov V.N., Stepanova I.Je. Metod S-approximacij i ego ispol'zovanie pri reshenii zadach gravimetrii (regional'nyj variant) [S-approximation method and its use in solving the problems of gravimetry (regional version)]. Fizika Zemli. 2002. No.7. Pp. 3–12. (in Russian)

17. Strahov V.N., Stepanova I.Je., Kerimov I.A. K voprosu o vychislenii popravok za rel'ef [On the question of calculating the corrections for the relief]. Fizika Zemli. 2002. No.4. Pp. 55–66. (in Russian)